

SIMULATION NUMERIQUE DU TRANSPORT DES SABLES SOUS L'EFFET DES VENTS DANS LE GOLFE DE TUNIS

Mouldi BRAHIM^{1*}, V. KOUTITONSKY², B. BEJAOU¹ et Ch. SAMMARI¹

1 : Institut National des Sciences et Technologies de la Mer-28, rue 2 mars 1934, Salammbô, 2025 Tunis (Tunisie),

2 : Institut des Sciences de la Mer-310, avenue des Ursulines Rimouski, Québec (Canada),

*mouldi.brahim@instm.rnrt.tn

ملخص

تمثيل رقمي لتتقل الرمال تحت تأثير الرياح في خليج تونس : إن الهدف الأساسي لهذه الدراسة هو التمثيل الرقمي لديناميكية الرواسب في خليج تونس عن طريق النمذج الرقمي (Mike 21) ثنائي الأبعاد. إن تحرك الرواسب في هذه المناطق جد مرتبط باتجاه وقوة تحرك المياه القاعية. وإن تحرك هذه المياه مرتبط باتجاه وقوة الرياح على سطح المياه. اهتمت هذه الدراسة بأخذ الرياح كعامل أساسي لديناميكية الماء والرواسب، وقمنا بنمذجة تحرك المياه والرواسب بأخذ سرعة الرياح تساوي 7 m/s مع تغيير جميع اتجاهاتها. قمنا بتطبيق النمذج الرقمي (Mike 21) للتعرف على ديناميكية المياه والرواسب الغير العالقة بخليج تونس. وأعطى هذا التمثيل الرقمي سرعة واتجاه المياه والرواسب في خليج تونس وبين لنا كمية الرواسب المتنقلة. كما بينت هذه الدراسة أن كمية الرواسب المتنقلة بين رأس قرطاس وسليمان أهم من حيث الكمية مقارنة بالكمية المتحركة بين سيدي بوسعيد وحلق الوادي. إن الكتلة المتحركة لها ارتباط كلي بسرعة التيار من جراء الأمواج والانحدار.

RESUME

La dynamique sédimentaire le long de littoral est étroitement liée à la direction et à l'intensité des courants littoraux engendrés par les vents, les vagues et la marée. L'objectif de cette étude est de simuler numériquement la circulation et le transport des sédiments non cohésifs (sables) le long du littoral du golfe de Tunis sous l'effet unique des vents. Plusieurs directions des vents ont été imposées au modèle hydrodynamique MIKE21-HD tout en gardant une vitesse constante de 7 m.s⁻¹. Les courants stationnaires générés par ces vents ont ensuite servi à forcer le modèle de transport de sédiments non cohésifs MIKE21-ST. En supposant que la quantité de sable disponible est illimitée, les simulations montrent que les taux de transport de sédiment du côté est du golfe de Tunis (Ras Fartas, Soliman) sont plus importants que ceux du côté Ouest (Sidi Bou Saïd - La Goulette) et cela à cause des effets conjugués de la houle et des rapprochements des isobathes.

Mots Clés : Simulations numériques, circulation des eaux, transport de sables, Golfe de Tunis Modèles numériques MIKE21.

ABSTRACT

Numerical simulation of sand transport under the effect of winds in the gulf of Tunis : Sediment dynamics along a littoral is closely dependent on the direction and the intensity of the littoral currents generated by winds, waves and tides. The objective of this study is to simulate the water circulation and the non cohesive sediment (sand) transport along the littoral of the gulf of Tunis only under the effect of winds. Several wind directions were imposed on the 2D hydrodynamic model MIKE21 while keeping the speed at a constant 7 m.s⁻¹. The resulting stationary currents were then imposed to the non cohesive sediment transport model MIKE21-ST. The numerical simulations showed that the rates of transport along the eastern side of the gulf of Tunis (RasFartas, Soliman) are more important than those along the western side (Sidi Bou-Said, La Goulette) because of the combined effects of the swell and closely spaced isobaths.

Key words: Numerical simulations, water circulation, sand transport, Gulf of Tunis, MIKE21 models.

INTRODUCTION

Les zones littorales ont toujours présenté un grand intérêt dans le monde entier et sont, aujourd'hui, le siège d'activités multiples (loisirs, commerce, agricole). Ces zones connaissent cependant une érosion importante régression suite au déséquilibre du

transport littoral découlant de facteurs naturels et anthropiques.

Afin de comprendre le phénomène de la stabilité des côtes (particulièrement les régions sableuses), il est primordial d'étudier les facteurs qui animent la dynamique sédimentaire le long de ces côtes, notamment les courants générés par les vents, les

vagues et les marées. En présence de courants importants, les sédiments cohésifs (boues) seront transportés ailleurs et seuls les sédiments non cohésifs (sables) demeurent en place.

Plusieurs approches ont été utilisées pour calculer le transport total des sédiments non cohésifs. Certaines méthodes consistent à faire la somme du transport en suspension et du transport par charriage [Einstein (1950); Bagnold (1966), Bijker (1971) et van Rijn (1984)] alors que d'autres méthodes sont plutôt basées sur des formulations empiriques (Engeland-Hansen (1967) et Ackers and white (1973). Le transport de sédiments non cohésifs dans cette étude est estimé par la méthode empirique de Engand et Hansen. Cette méthode est l'une des méthodes offertes en option dans le modèle de transport de sédiments non cohésifs MIKE21-ST.

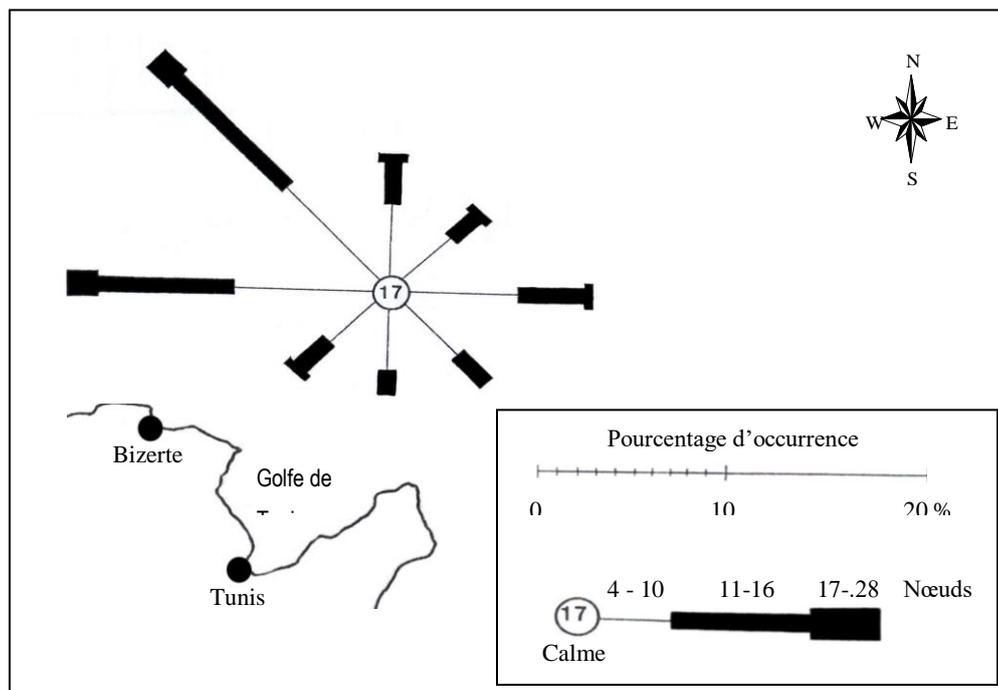
Cette étude a pour objectif de simuler la circulation des eaux et le transport de sables uniquement sous l'effet des vents dans le golfe de Tunis.

La répartition des vents au large a été établie à partir des statistiques publiées par l'Institut National de la Météorologie durant la période de 1971 et 1981 (Figure 1). Les statistiques annuelles des vents au large du golfe de Tunis sont représentées sous forme de rose des vents, indiquant pour chaque force de vent et pour chaque direction la fréquence d'occurrence.

Au large du golfe de Tunis et en toute saison, ce sont les vents des secteurs Ouest et Nord-Ouest qui sont les plus fréquents et les plus forts. Les vents calmes représentent environ 17% de cas observés. Les vents

de vitesse supérieure à 14 m.s^{-1} ne représentent que 1% des cas observés (El Arrim, 1996). La période hivernale est marquée par des vents forts et fréquents des secteurs Nord et Ouest alors que pendant la période estivale se sont les vents des secteurs Est et Sud-Est, vents moins forts et moins fréquents, qui soufflent (Ben Charrada, 1997). Les vents de secteur Nord Est, même s'ils sont moins fréquents, engendrent des houles de secteurs Nord Est. Ces houles ont le plus grand effet sur le transport des sédiments dans le golfe de Tunis. Dans cette étude, la circulation des eaux et le transport de sédiments ont été étudiés sous l'effet des vents de directions différentes mais de même vitesse constante de 7 ms^{-1} . Cette vitesse représente la moyenne des vitesses pendant une année.

Des travaux récents sur la granulométrie des sédiments de surface ont intéressé la frange littorale du golfe de Tunis pour les profondeurs allant de 0 à 20 m. Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet **ESSAHEL** (Elaboration d'un Schéma Sédimentologique et Analyse de l'Hydrodynamisme des Eaux du Littoral). Saïdi (2004) a analysé la granulométrie des sédiments superficiels de la frange littorale située entre Sidi Bou Saïd et la Goulette. Ses travaux ont montré que la plage sous-marine est tapissée par des sables fins, généralement bien à très bien classés. Ces sables se déplacent, essentiellement, par suspension gradée. Ils sont déposés dans un milieu peu agité avec évacuation des particules fines vers le large par les houles. Les courbes cumulatives semi-logarithmiques



des sédiments de surface de la plage sous-marine, ont, en général, la forme d'un S à forte pente, bien redressé et bien régulier. Ceci montre qu'on a un stock sédimentaire homogène et des conditions d'énergie adaptées à la charge transportée.

La répartition spatiale des sables montre :

- un affinement de la taille des grains du Nord (350 µm) vers le Sud (250 µm). Il s'agit d'un tri granulométrique Nord – Sud, du aux courants de dérive littorale. Ces courants mobilisent facilement les particules fines de la zone située entre Sidi Bou Saïd et la pointe de Salammbô. Ils la privent d'une partie de ses propres sédiments et la rendent fragile. Les sédiments fins en transit sont arrêtés par les épis et la jetée nord du port de pêche de la Goulette d'où l'engraissement marqué entre la pointe de Salammbô et la Goulette.

- un grano-classement décroissant de la côte vers le large. Il est assuré par les courants transversaux, qui déposent, lors du déferlement, les particules grossières près de la côte et au niveau de la plage sous-marine peu profonde. Les particules fines sont transportées par les courants de retour, perpendiculaires au rivage, de la côte vers le large. Ces travaux ont pu montrer que la taille moyenne des sédiments de surface est de l'ordre de 350 µm (Saïdi, 2004).

L'ensemble de ces informations seront utilisés lors de l'assignation des paramètres d'entrée du modèle de transport de sédiments. La méthodologie adoptée et les modèles numériques utilisés sont présentés à la section I. Les résultats des simulations sont présentés à la section II et discutés à la section III. Une conclusion est offerte à la section IV.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

La circulation de l'eau et du transport total des sédiments non cohésifs dans le Golfe de Tunis ont été calculés respectivement par les modules MIKE21-HD et MIKE21-ST. Il s'agit en un premier temps de construire une grille de calcul commune aux deux modèles (figure 2). Cette grille est constituée de 350 mailles en X (Est) et 350 mailles en Y (Nord). Les dimensions des mailles sont de 250 x 250 m. Les profondeurs interpolées à chaque maille ont été extraites de la carte bathymétrique 948 du golfe de Tunis.

1 Le modèle hydrodynamique MIKE21-HD

Le modèle MIKE21-HD est un modèle bidimensionnel à surface libre basé sur la discrétisation par différences finies des équations de la continuité et de la quantité de mouvement dans les deux directions qui sont intégrées sur la verticale. Le modèle simule la circulation des eaux ainsi que les variations du niveau de la surface libre dans des milieux peu profonds aussi variés que les lacs, les estuaires, les baies et les zones côtières. (DHI, 2005).

Équation de continuité

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = S - e$$

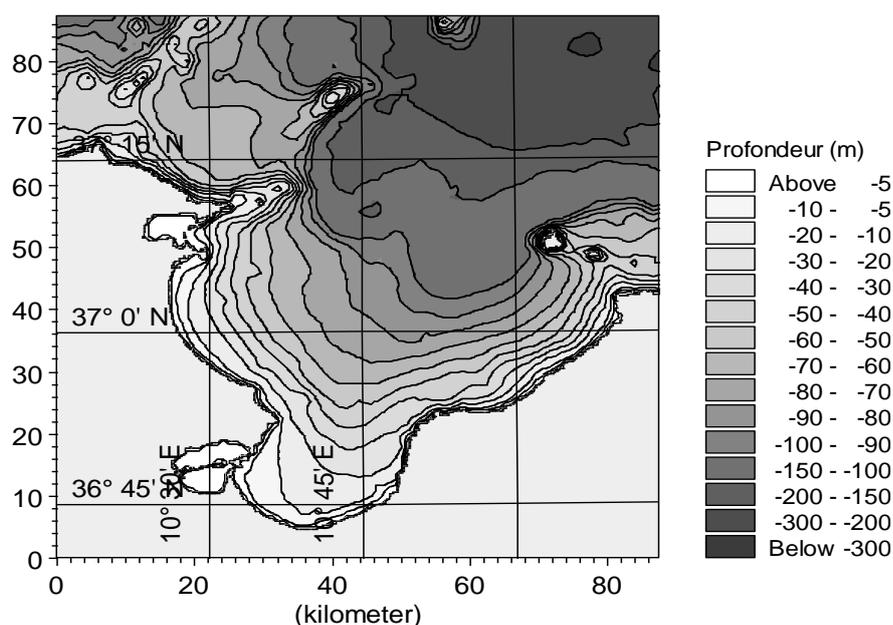


Figure 2: Bathymétrie du golfe adoptée dans les modèles MIKE21-HD et MIKE21-ST.

Équation de la quantité de mouvement selon x

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) - fq =$$

$$-gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h} + C_D |W| W_x + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(E_x h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + S_{ix}$$

Équation de la quantité de mouvement selon y

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + fp =$$

$$-gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h} + C_D |W| W_y + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(E_x h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + S_{iy}$$

Les variables dans ces équations sont :

t : temps (s) ;

x,y : coordonnées cartésiennes horizontales (m) ;

$\eta(x,y,t)$:niveau de la surface au-dessus du niveau de référence (m) ;

$p(x,y,t)$: densité de flux dans direction x (m^2s^{-1}) ;

$q(x,y,t)$: densité de flux dans direction y (m^2s^{-1}) ;

$h(x,y,t)$: profondeur de l'eau (m) ;

u, v : vitesses de l'eau intégrées sur la verticale (m/s)

S :débit de la source par unité de surface horizontale (ms^{-1}) ;

e :taux d'évaporation (ms^{-1}) ;

S_{ix} , S_{iy} : quantité de mouvement de la source dans les directions x et y (m^2s^{-2}) ;

g : accélération de la gravité (ms^{-2}) ;

f :paramètre du Coriolis (s^{-1}) ;

C :nombre de frottement de Chezy ($m^{1/2}s^{-1}$) ;

W : vitesse du vent (ms^{-1}) ;

W_x , W_y : vitesses du vent dans les directions x et y (ms^{-1}) ;

P_a :pression atmosphérique ($kgm^{-1}s^{-3}$) ;

ρ :masse volumique de l'eau ($kg m^{-3}$) ;

$E_x(x,y)$, $E_y(x,y)$: coefficient de dispersion dans la direction x et y (m^2s^{-1}).

$s = \rho_s/\rho$: densité spécifique (SD),

C_D : coefficient de traîné du vent (SD).

Ces équations sont résolues par des méthodes numériques implicites à différences finies où les variables h, p et q sont définies sur des mailles du type Arakawa-C. Pour éviter les itérations, on utilise la méthode dite à « pas de temps fractionné » combinée avec l'algorithme « implicite de direction alternée (ADI) ».

Les conditions aux frontières ouvertes du modèle MIKE21-HD peuvent être spécifiées soit par un niveau constant ou par un niveau variable dans l'espace et dans le temps ou bien par un flux de volume dans une direction spécifiée. Une source et/ou

un retrait de masse ou de volume n'importe où dans le domaine peuvent aussi être spécifiés, et une surface initiale du niveau peut être imposée à toute la grille de calcul. Dans le cas du Golfe de Tunis, il existe trois frontières ouvertes (figure 2). Un niveau constant dans l'espace et le temps, égal au niveau moyen de la mer, a été imposé à ces trois frontières. Pour la stabilité du modèle, une même profondeur a été assignée aux trois premières mailles parallèles à chaque frontière ouverte. La rugosité du fond imposée est de 0.05 m et les coefficients de dispersion turbulente en X et Y sont de $5 m^2s^{-1}$.

2 Le Modèle de transport des sédiments non cohésifs MIKE21-ST

Le calcul du taux de transport solide prend en compte différentes catégories de mouvements du charriage à la suspension. En général, on suppose qu'un régime d'équilibre est établi localement, et que le flux effectivement transporté est égal à la capacité du transport de l'écoulement indépendamment de la disponibilité des matériaux.

Le transport solide dépend de la forme du fond, du frottement, de la qualité de sédiments en suspension, de leurs vitesses, qui sont autant de facteurs liés à l'écoulement : le transport solide est donc une fonction complexe des vitesses des fluides. Le module du transport de sédiments non cohésif dans ce cas tient compte de la formule de Engelund et Hensen (1967). La formulation quantifie le débit total de sédiment q_t ($kg.m^{-1}.s^{-1}$) :

$$q_t = \frac{0.05 \bar{U}^5}{(s-1)^2 g^{1/2} D_{50} C^3}$$

Le volume solide des sédiments non cohésifs transporté par unité de largeur et par unité de temps tient aussi compte du diamètre moyen des sédiments (D_{50}), de la vitesse de l'eau intégrée sur la verticale (\bar{U}), de la densité relative des grains des particules par rapport à l'eau ($s = \rho_s / \rho$) et de l'accélération de la pesanteur (g). Les valeurs imposées au modèle MIKE21-ST sont $D_{50} = 0.00025$ m, \bar{U} = sorties du modèle MIKE21-HD, $s=2.65$ et $g=9.8$ ms⁻². La durée de la simulation est d'une semaine jusqu'à stabilisation du modèle.

RÉSULTATS

1 Circulation des eaux

La circulation des eaux dans le Golfe de Tunis sous l'effet des vents est résumée ci-dessous.

Un vent du Nord-Est (figure 3) engendre deux courants de dérives près des côtes. Le premier est de direction Nord vers le Sud et s'étend de Ghar EL Melh à la Goulette et le deuxième est de direction Nord-Est vers Sud-Ouest entre la région de Ras Fartas et Bourg – Sédria. Dans la zone entre Ras Farta et les îles Zembra et Zembretta, un courant giratoire se forme. L'eau entre du côté Est et sort de du côté Ouest. A l'intérieur du petit golfe l'eau est poussée vers la côte de Salammbô et elle sort au centre du petit golfe entre les deux côtes Est et Ouest.

Un vent d'Est (figure 4) engendre aussi des courants de dérives littorales. La direction de ces courants est de Nord-Est vers le Sud-Ouest du côté Est du golfe et de direction Sud vers le Nord du côté Ouest du golfe de Tunis. Nous pouvons constater qu'un courant giratoire dans le sens des aiguilles d'une

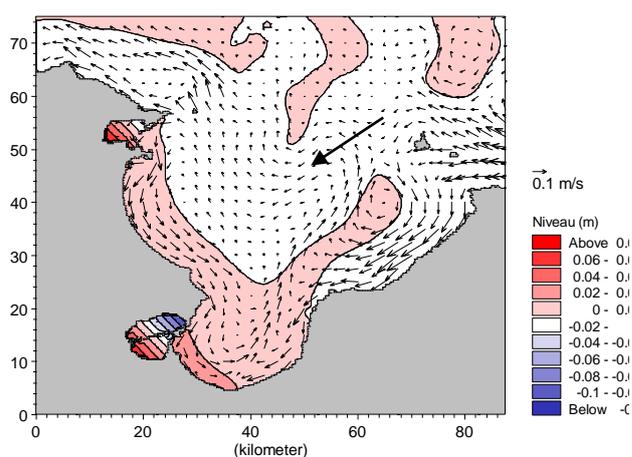
montre se forme au centre du golfe. Un autre courant giratoire moins important est observé au voisinage de la zone de Ghar El Melh. L'eau entre du côté Ouest et sort du côté Est du golfe.

Un vent du Sud-Est (figure 5) montre des résultats semblables à ceux observés pour un vent de direction Est.

Un vent du Nord Ouest (figure 6) montre des courants de dérives littorales. La direction de ces courants est du Nord vers le Sud du côté Ouest et de direction Sud-Ouest vers le Nord-Est du côté Est du golfe. Nous pouvons constater qu'un courant giratoire dans le sens contraire des aiguilles d'une montre se forme au centre du golfe. La vitesse de ce courant giratoire est faible au centre du golfe par rapport à celle collée à la côte. L'eau entre du côté Ouest et sort du côté Est du golfe.

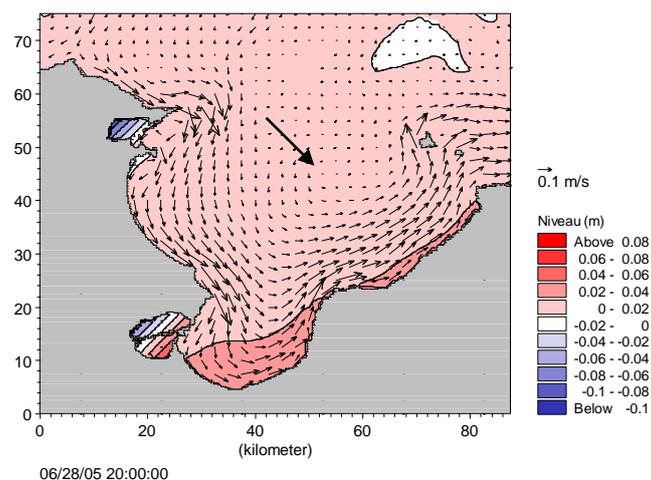
Un vent d'Ouest (figure 7) engendre des courants de dérives littorales du Nord vers le Sud du côté Ouest du golfe et de direction Sud-Ouest vers Nord-Est du côté Est du golfe. Un courant giratoire collé vers la côte se forme dans la zone entre Ghar El Melh et Gammarth et tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. L'eau est poussée du côté Ouest vers l'Est.

Un vent de Sud-Ouest (figure 8) génère des courants de dérives littorales. La direction de ces courants est du Sud vers le Nord du côté Ouest du golfe et de Sud-Ouest vers le Nord-Est du côté Est du golfe de Tunis. Un courant giratoire dans le sens des aiguilles d'une montre se forme entre la région de Cap Carthage et Ghar El Melh. Au centre du golfe, l'intensité des courants est faible. L'eau entre du côté Ouest et sort du côté Est.



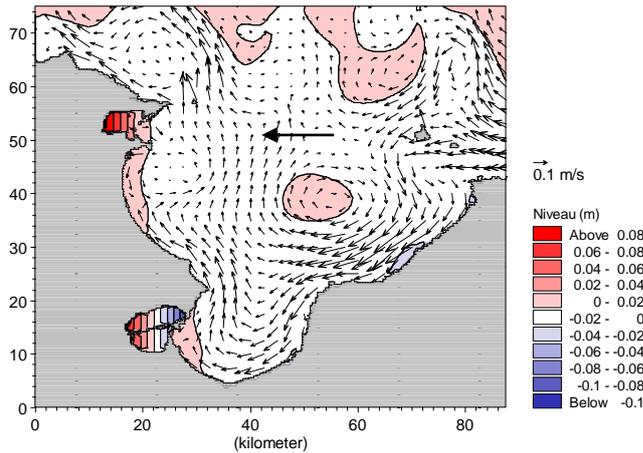
06/28/05 20:00:00

Figure 3: Circulation des eaux dans le Golfe de Tunis, vent de direction Nord-Est et d'intensité de 7m.s⁻¹

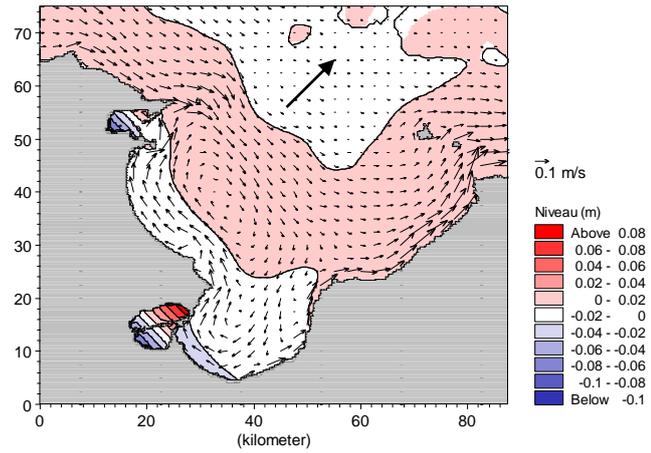


06/28/05 20:00:00

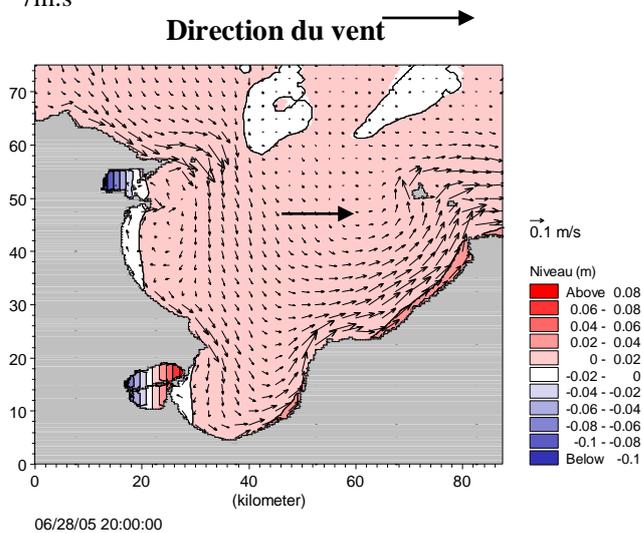
Figure 4: Circulation des eaux dans le Golfe de Tunis, vent de direction Nord-Ouest et d'intensité de 7m.s⁻¹



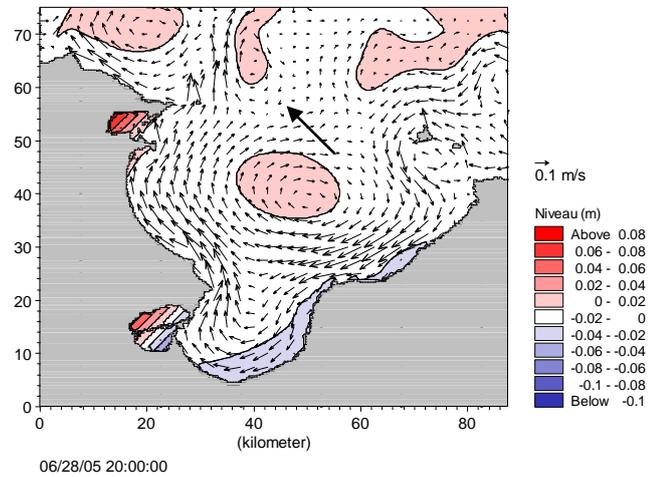
06/28/05 20:00:00
Figure 5: Circulation des eaux dans le Golfe de Tunis, vent de direction Est et d'intensité de $7m.s^{-1}$



06/28/05 20:00:00
Figure 7: Circulation des eaux dans le Golfe de Tunis, vent de direction Sud-Ouest et d'intensité de $7m.s^{-1}$



06/28/05 20:00:00
Figure 6: Circulation des eaux dans le Golfe de Tunis, vent de direction Ouest et d'intensité de $7m.s^{-1}$



06/28/05 20:00:00
Figure 8: Circulation des eaux dans le Golfe de Tunis, vent de direction Sud-Est et d'intensité de $7m.s^{-1}$

2 Transport des sédiments non cohésifs

La simulation du taux du transport des sédiments non cohésifs est représentée dans la figure 10. Le taux de transport moyen est de l'ordre de $37.10^{-4}kg.m^{-1}.s^{-1}$. Du côté Ouest, le transport se fait du Nord vers le Sud du golfe. Du côté Est, le transport de sable est plus important à cause de la variation des profondeurs et des rapprochements des isobathes.

Les résultats de la simulation montrent un déplacement des sédiments du côté Ouest entre Sidi Bou-Saïd et la Goulette concordent avec les résultats de Saïdi (2004) sur l'évolution de la granulométrie. En effet, Saïdi (2004) a montré qu'il y a un grano-classement des sédiments non cohésifs du nord vers le sud entre sidi Bou-Saïd et la

Goulette. En d'autres termes, la taille des sédiments diminue de Sidi Bou-Saïd vers la Goulette. La simulation du transport de sédiments (figure 9) montre d'ailleurs un transport du Nord vers le Sud; entre Sidi Bou Saïd et la Goulette.

DISCUSSIONS

Dans le cadre des travaux de recherche de l'INSTM, un courantomètre a été mouillé dans la région de Ghar El Melh ($37^{\circ} 9,001' N$ et $10^{\circ} 15,263' E$) le 3 février 2006 et récupéré le 2 mars 2006. Le courantomètre a été installé dans une profondeur de 18 m Les résultats montrent que le courant moyen est de l'ordre de $12 cm.s^{-1}$ (figure 10) et que la direction moyenne est orientée vers le Nord/Nord-Ouest. Toutefois, des changements de direction sont observés cinq fois en quatre semaines

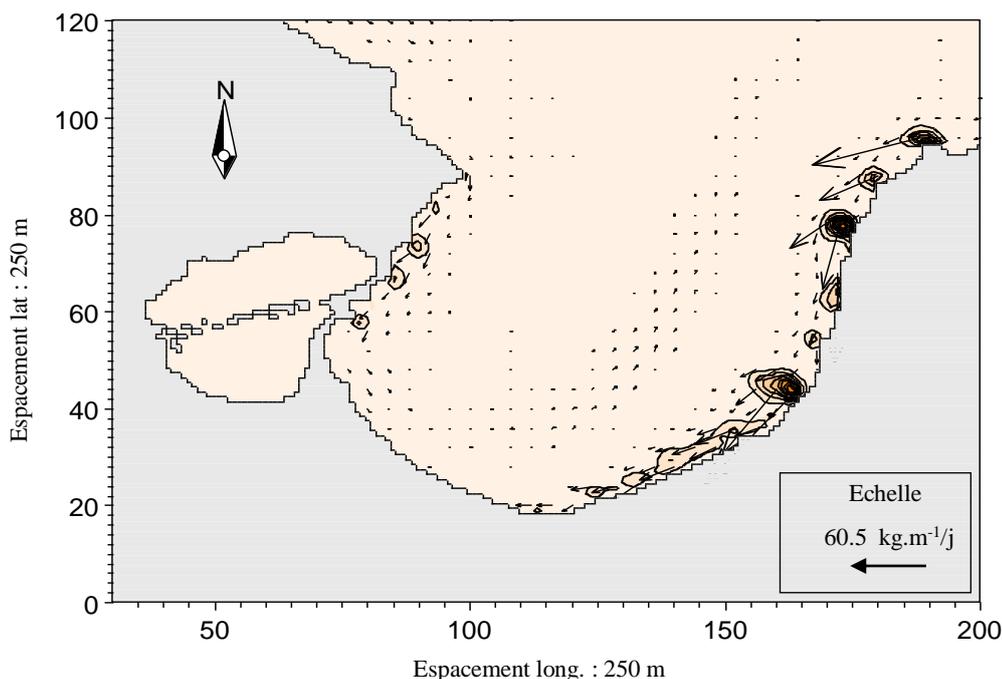


Figure (9) : Taux de transport de sables par vents de 7m.s^{-1} du Nord-Est. La flèche au centre du Golfe est la direction du vent.

Ces évènements sont certainement associés à des coups de vents. Il est également utile de mentionner que durant la période d'enregistrement des vitesses de pointe à 89 cm/s a été mesuré. Ces vitesses ont été enregistrées à deux reprises durant toute la période.

Un modèle de circulation des masses d'eaux le long des côtes tunisiennes à grille étirée a été mis en place (Boukadi, 2005). Les simulations faites avec ce modèle ont permis de révéler des structures fines qui ne sont pas simulées par un modèle à grille régulière. Les sorties des courants de surface forcés par un vent Ouest et du niveau de l'eau ont donné des résultats comparables à ceux des sorties du modèle MIKE21-HD.

Les courants simulés par Ben Cherrada (1997) le golfe de Tunis à l'aide d'un modèle de circulation en 2D montrent des résultats comparables avec ceux de la présente étude, dans les mêmes conditions de vent.

A partir des plans de houles (Italconsult, 1973), El Arrim (1996) a pu déterminer pour chaque site dans le golfe de Tunis les débits du transit littoral total annuels moyens dans le golfe de Tunis. L'étude la plus récente de Béjaoui et al. (1997, 2002) a donné une estimation du transit de l'ordre de $2000\text{ m}^3/\text{an}$ en appliquant le modèle UNIBEST (Delft Hydraulics, 1992) au niveau de la zone de Sidi Bou Saïd (Tableau I).

Tableau I: Débit de sédiment transporté à différentes périodes dans le golfe de Tunis

Auteurs	Zone (Gammarth- La Goulette)
LCHF (1982)	$17\ 000\text{ m}^3/\text{an}$
Italconsult (1973)	$30\ 000\text{ m}^3/\text{an}$
SOGREAH (1974, 1981 et 1985)	$27\ 600\text{ m}^3/\text{an}$
Sliti (1990)	$25\ 000\text{ m}^3/\text{an}$
El Arrim (1996)	$17\ 183\text{ m}^3/\text{an}$
Béjaoui et al. (2002)	$2000\text{ m}^3/\text{an}$ (Sidi Bou Saïd - La Goulette)

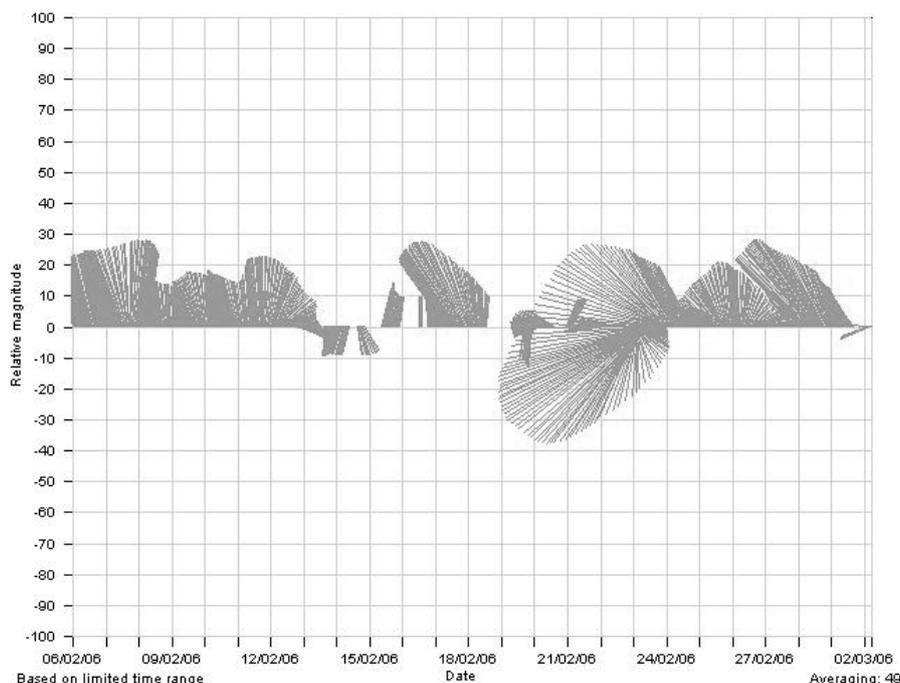


Figure 10 : Intensité et direction des courants près de la surface dans la région de Ghar El Melh (du 06/02/2006 au 02/03/2006)

CONCLUSIONS

L'application du modèle numérique MIKE21 a permis de montrer la direction et l'intensité des courants de surface dans le golfe de Tunis et la circulation générale des eaux en surface en imposant des conditions aux limites (niveau de l'eau) et en appliquant différentes directions des vents avec une vitesse constante de l'ordre de 7 m/s. L'application du modèle hydrodynamique MIKE21-HD couplé à celui du transport de sédiment MIKE21-SD a déterminé le taux et le sens du transport des sédiments non cohésifs dans le golfe de Tunis. Le taux est de l'ordre de $37 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ entre Sidi Bou Saïd et la goulette. Ce taux est beaucoup plus important du côté Est entre Ras Fartas et Soliman. Du côté Est, l'effet de la dynamique est beaucoup plus important sur le transport de sédiment à cause de l'effet directe de la houle et des isobathes très serrées dans cette zone. Les courants transportent tous les sables fins et grossiers.. Il est souhaitables de confirmer ces résultats par l'installation d'un ou plusieurs houlographes dans le golfe de Tunis. Ces résultats serviront pour le calibrage du Modèle hydrodynamique et du transport de sédiments.

L'application de ces modèles au transport des sédiments permettra d'étudier les phénomènes du transport et de la sédimentation au niveau du littoral

tunisien et notamment au niveau des ports ou dans les lagunes tunisiennes.

BIBLIOGRAPHIE

- Ackers P. and White W.R., 1973 : Sediment Transport, New approach on Analysis. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, N° HY 11, USA
- Bagnold R. A., 1966 : An approach to the Sediment Transport Problem from general Physics. Geological Survey Prof. Paper 422-I Washington.
- Bijker E. W., 1971: Longshore Transport computations. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, Vol. 97, N° WW4.
- Béjaoui B., Brahim M., Ben Mouelli I. et Rais S., 2002 : Modélisation de l'évolution du trait de côte et de la protection du littoral dans le golfe de Tunis. Bull. Inst. Natn. Scien. et Tech. Mer de Salammbô, Vol. 29, pp. 41-52.
- Béjaoui B., Ben Mouelli I. et Rais S., 1997 : Evolution et protection du littoral dans le golfe de Tunis. Mémoire de Projet de Fin d'Etudes (PFE) – Département de Génie Civil, ENIT, 108p.
- Ben Charrada R., 1997 : Etude hydrodynamique et écologique du complexe golfe-lac de Tunis,

- contribution à la modélisation de l'écosystème pélagique des eaux côtières de Tunis. Thèse de Doctorat en génie Hydraulique, ENIT, 400p.
- Boukadi K., 2005 : Mise en place d'une grille dynamique à haute résolution pour le modèle des côtes Tunisiennes. Mémoire de Mastère, Hydrodynamique et Modélisation des Environnement côtiers, ENIT/INSTM, 76p.
- Delft Hydraulics, 1992: Manual of UNIBEST.
- DHI, 2005: User Guide and reference Manual, Danish Hydraulics Institute, Copenhagen.
- Einstein H. A., 1950 : The Bed-Load Function for sediment Transportation in Open Channel Flow. Technical Bulletin N° 1026, U. S. Dep. of Agriculture, Washigton, D.C.
- Engelund F. and Hansen E., 1967: A Monograph on sediment Transport in Alluvial Streams. Nordic hydrology 7. Report N° X2344/LV, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- El Arrim A., 1996: Etude d'impact de la dynamique sédimentaire et des aménagements sur la stabilité du littoral du Golfe de Tunis. Diplôme de Doctorat de Spécialité en Géologie. Faculté des Sciences, Tunis, 208p.
- INM, 2004 : Données climatiques et statistiques annuelles des vents
- Italconsult T., 1973 : Projet d'infrastructure touristique. Contrôle de l'érosion marine. Rapport. O.N.T.T., Tunis, 187p.
- Koutitonsky V.G., 2005 : Rapport de recherche LHE-05-01. Laboratoire d'hydraulique environnementale, ISMER, Rimouski, 99p.
- LCHF, 1982 : Protections des plages sud de Tunis. 1^{ère} partie : diagnostique sédimentologique. Minist. Equip. Dire. Serv. Aériens et maritimes.
- Saïdi H., 2004 : Etude de la dynamique sédimentaire de la frange littorale Sidi Bou Saïd-la Goulette. DEA.Géol.Ap. à l'Environnement. Fac. Sci. Tunis. 125p.
- Sliti M., 1990 : Fonctionnement des brise- lames dans le système marin littoral du golfe de Tunis. Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Bordeaux 1, 222 p.
- SOGREAH, 1981 : Société grenobloise des Aménagements Hydrauliques : Plages de Tunis ; Mesures conservatoires pour la protection des plages après la tempête de Janvier 1981. 13p.
- SOGREAH, 1974 : Etude de l'engraissement des plages du Nord de Tunis. Rapport Minist. Equip. Tunisie, T. 3, 105p.
- SOGREAH, 1985 : Réhabilitation de la protection des plages du Nord de Tunis et de Mahdia. Rapport. Minist. Equip. Tunisie, Tunisie, 60p.
- Van Rijn L. C., 1984a : Sediment Transport, Part I : Bed Load Transport. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, N°10.
- Van Rijn L. C., 1984b : Sediment Transport, Part II : Suspended Load Transport. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, N°11.
- Van Rijn L. C., 1984c : Sediment Transport, Part III : Bed Forms and Alluvial Roughness. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, N°12.